

Моделювання робочих процесів машин

УДК 624.132.3

М.К. Сукач, д.т.н., професор;
Ю.П. Филонов, к.ф.-м.н., доцент;
Р.Ю. Новиков (КНУСА, Киев)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО РЕЗАНИЯ СУГЛИНКА

АННОТАЦІЯ. Розглянуто щілинне різання суглинку широким плоским ножом в умовах утворення зони пластичної деформації перед лобовою гранню ножа і умови виникнення її випирання. Визначені максимальний кут різання, при якому виникає ядро ущільнення на ножі, а також тиск на його лобовій поверхні і розмір зони зруйнованого ґрунту.

Ключові слова: щілинне різання, суглинок, ніж, кут різання, пластична деформація

АННОТАЦИЯ. Рассмотрено щелевое резание суглинка широким плоским ножом в условиях образования зоны пластической деформации перед лобовой гранью ножа и условия возникновения ее выпора. Определены максимальный угол резания, при котором возникает ядро уплотнения на ноже, а также давления на его лобовой поверхности и размер зоны разрушенного грунта.

Ключевые слова: щелевое резание, суглинок, нож, угол резания, пластическая деформация

SUMMARY. The crack cutting of loam is considered by a wide flat knife in the conditions of formation of zone of flowage before the frontal verge of knife and condition of origin of her sticking out. Certain maximal corner of cutting, at which a kernel of compression is on a knife and also pressures on the frontal surface of knife and sizes of zone of the destroyed soil.

Key words: crack cutting, loam, than, cutting corner, flowage

Введение

В работе [1] авторами предложена аналитическая модель резания грунта широким плоским ножом землеройной машины в условиях образования пластической зоны деформации, которая развивается по ходу движения ножа вперед перед его лобовой гранью. Определены условия и основные уравнения процесса резания грунта пластически деформирующейся массой без ядра уплотнения; получены зависимости, связывающие физико-механические характеристики грунтовой среды и геометрические параметры режущего ножа.

Целью работы является определение максимального угла δ_2 , при котором резание суглинка, происходящее в условиях пластической деформации без образования ядра уплотнения, переходит в процесс его резания с ядром уплотнения, т.е. определение начала образования нароста на ноже.

Изложение основного материала

В наших исследованиях сохраним условные обозначения, принятые в работе авторов [1] по щелевому резанию грунта в условиях деформирования грунта перед лобовой гранью ножа (согласно рис. 1 этой работы), и продолжим нумерацию формул. Используем также результаты аналитического исследования щелеобразования, при котором резание грунта происходит ядром уплотнения на лобовой поверхности широкого плоского ножа [2]. И, наконец, не забываем о возможности реализации щелевого резания грунта при некоторых минимальных углах $\delta \leq \delta_1$, когда грунт перемещаясь по поверхности ножа в боковую сторону и в своды щели, не переходит в пластическое состояние [3].

1. Определение максимального угла пластического резания суглинка

Итак, резание ядром уплотнения начинается (по мере роста угла резания δ), когда

величина t , характеризующая давление грунта на ноже, достигает значения \bar{t} . Значит, максимальный угол δ_2 можно определить из уравнения [1, (39)] при значениях величин $u = \bar{u}$; $g = \bar{g}$ (риска над параметром означает его граничное значение).

Из работы [2] известно, что: $\bar{t} = \frac{\omega_0}{1 + \omega_0}$

(формула 7), $\bar{u} = \frac{6\omega_0 + 11\omega_0^2}{12(1 + \omega_0)^2}$ (формула 10),

$\bar{g} = \frac{m}{\bar{t}} + n = \frac{2ac}{\omega_0} + \text{tg}\theta$ (формула 29). Здесь

обозначено ω_0 – минимальная величина активной пористости грунта; $m = \frac{2ac}{1 + \omega_0}$

сцепление грунта; a – коэффициент уплотнения грунта, $-a = \frac{\Delta\omega}{\Delta\sigma}$; σ – давление

грунтовой среды; $\Delta\omega$, $\Delta\sigma$ – соответственно изменения пористости и давления грунта; $n = \text{tg}\theta$; θ – угол внутреннего трения грунта.

Тогда

$$\bar{u} = \frac{6\omega_0 + 11\omega_0^2}{12(1 + \omega_0)^2} = \frac{\bar{t}}{2} \left(1 + \frac{5}{6}\bar{t} \right). \quad (40)$$

Соотношение между углом резания δ и параметром давления грунта на ноже t при наличии выпирающей перед ножом пластической зоны деформации грунта и отсутствии ядра уплотнения на ноже, определяется зависимостью (39) работы [1]:

$$\frac{\delta'}{1 - \mu'\delta'} + \frac{u}{\delta' + \mu'} = \frac{2,12\gamma'u}{g},$$

где $\delta' = \text{tg}\delta$; $\mu' = \text{tg}\mu$; μ – угол внешнего трения грунта по ножу; величина $u \approx 0,6t$; $\gamma' = \cos\gamma$; γ – угол резания ножа в плане (рис. 1).

Обозначим

$$\bar{A} = \frac{2,12\gamma'\bar{u}}{\bar{g}} \quad (41)$$

и запишем [1, (39)] в виде квадратного уравнения по $\delta' = \text{tg}\delta_2$:

$$(1 + \mu'\bar{A})\delta'^2 - (\bar{u}\mu' - \mu' + \bar{A} - \mu'^2\bar{A})\delta' + \bar{u} - \mu'A = 0. \quad (42)$$

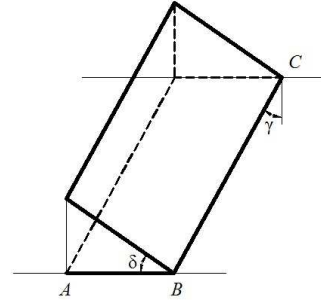


Рис. 1. Режущий нож

Предыдущее уравнение [1, (39)] для угла $\delta' = \text{tg}\delta_2$ имеет вид:

$$\frac{\delta'}{1 - \mu'\delta'} + \frac{\bar{u}}{\delta' + \mu'} = \bar{A}. \quad (43)$$

Левая часть уравнения (43) на интервале $-\mu' < \delta' < \frac{1}{\mu'}$ имеет график, показанный на рис. 2 с одним минимумом (здесь один корень $\delta = \frac{\sqrt{\bar{u}} - \mu'}{1 + \sqrt{\bar{u}}\mu'}$ производной в указанном промежутке).

Отсюда видно, что оба корня (43) могут быть положительными. Необходимость выбора большего корня покажем ниже. Этот корень квадратного уравнения (42), после упрощений, равен

$$\delta' = \frac{(\bar{u}\mu' - \mu' + \bar{A} - \mu'^2\bar{A})}{2(1 + \mu'\bar{A})} + \frac{\sqrt{(\bar{u}\mu' - \mu' + \bar{A} - \mu'^2\bar{A})^2 - 4(1 + \mu'\bar{A})(\bar{u} - \mu'A)}}{2(1 + \mu'\bar{A})} = (44)$$

$$= \frac{\bar{u}\mu' + \bar{A} + \sqrt{[\bar{A}(1 + \mu'^2) - \mu'\bar{u} + \mu']^2 - 4\bar{u}}}{2(1 + \mu'\bar{A})} - \frac{\mu'}{2}.$$

Из (41) величину \bar{A} запишем так:

$$\bar{A} = \frac{2\bar{u}}{\bar{g}'},$$

где $\bar{g}' = 0,94 \frac{\bar{g}}{\gamma'}$ и, умножая (44) в числителе и знаменателе на \bar{g}' , получим итоговую формулу для угла δ_2 :

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{\bar{u}(\mu' \bar{g}' + 2) + \sqrt{\left[2\bar{u}(1 + \mu'^2) + \mu' \bar{g}'(1 - \bar{u})\right]^2 - 4\bar{u}\bar{g}'^2}}{2(\bar{g}' + 2\mu'\bar{u})} = \frac{\mu'}{2}, \quad (45)$$

где $\mu' = \operatorname{tg} \mu$; $\bar{u} = \frac{6\omega_0 + 11\omega_0^2}{12(1 + \omega_0)^2}$;

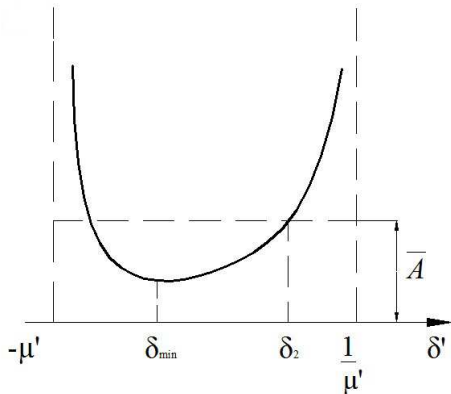


Рис. 2. Зависимость \bar{A} от δ'

$$\bar{g}' = \left(\frac{2ac}{\omega_0} + \operatorname{tg} \theta \right) \frac{0,94}{\cos \gamma'}.$$

К вопросу о выборе большего корня квадратного уравнения (42) (или (43)).

Решение [1, (39)] можно искать по формуле (45) с заменой \bar{u} на $u(t) = \frac{t}{2} \left(1 + \frac{5t}{6} \right)$ и

\bar{g}' на $g'(t) = \left(\frac{m'}{t} + n' \right) 0,94 = g'$. В этом случае из формулы (45) при $\mu' \approx 0$ и малых значениях g' , взяв оба корня, получим

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2u \pm \sqrt{4u^2 - 4ug'^2}}{2g'} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{g'^2}{u}}}{\frac{g'}{u}} =$$

$$= \frac{1 \pm \left(1 - \frac{g'^2}{2u} \right)}{\frac{g'}{u}} = \begin{cases} \frac{2 - \frac{g'^2}{2u}}{\frac{g'}{u}} & \text{- возрастает по } t \\ \frac{\frac{g'}{2}}{\frac{g'}{u}} & \text{- убывает по } t \end{cases}$$

(из определения $g'(t)$, $u(t)$).

Поскольку $t \rightarrow \bar{t}$ (возрастает), то при переходе угла δ через значение δ_2 следует, что выбирать надо больший корень. Это сохраняется и при других значениях параметров при естественном предположении о непрерывной зависимости процесса от них в данном случае.

2. Определение давления на лобовой поверхности ножа и размеров зоны пластического разрушения

Подставляя в формулу (39) работы [1] величины $u \approx 0,6t$ и $g = \frac{m}{t} + n$, получим (после умножения на g):

$$\frac{\delta'}{1 - \mu'\delta'} \left(\frac{m}{t} + n \right) + \frac{0,6t}{\delta' + \mu'} \left(\frac{m}{t} + t \right) = 2,12\gamma' 0,6t.$$

Умножение на t дает квадратное уравнение по величине t (записываем по степеням t):

$$\frac{\delta' m}{1 - \mu'\delta'} + \left(\frac{\delta' n}{1 - \mu'\delta'} + \frac{0,6m}{\delta' + \mu'} \right) t = 0,6 \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta' + n'} \right) t^2. \quad (46)$$

Единственный положительный корень уравнения (46) равен

$$t = \frac{\frac{\delta'n}{1-\mu'\delta'} + \frac{0,6m}{\delta'+\mu'} + \sqrt{\left(\frac{\delta'n}{1-\mu'\delta'} + \frac{0,6m}{\delta'+\mu'}\right)^2 + 2,4 \frac{\delta'm}{1-\mu'\delta'} \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta'+\mu'}\right)}}{1,2 \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta'+\mu'}\right)}. \quad (47)$$

Как показано в работе [3, формулы (24), (25)], проще (с ошибкой $\leq 10\%$) выглядит такое приближенное значение корня уравнения (46):

$$t = 0,9 \left[\frac{\sqrt{\frac{\delta'm}{(1-\mu'\delta')0,6 \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta'+\mu'}\right)}} + \frac{\frac{\delta'u}{1-\mu'\delta'} + \frac{0,6m}{\delta'+\mu'}}{0,6 \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta'+\mu'}\right)}} \right]. \quad (48)$$

Согласно [2, (5)], давление на верхней кромке ножа $\sigma_B = \frac{1+\omega_0}{a} t$; $m = \frac{2ac}{1+\omega_0}$; $u = \text{tg}\theta$; $\delta' = \text{tg}\delta$; $\mu' = \text{tg}\mu$; $\gamma' = \cos\gamma$; $n = \text{tg}\theta$.

Поэтому можно записать окончательное выражение для давления σ_B в зависимости от угла резания δ в интервале $[\delta_1, \delta_2]$, при котором происходит резание с пластическим деформированием грунта, но без нароста (ядра уплотнения) на ноже. Для этого умножаем формулу (48) на $\frac{1+\omega_0}{a}$ и подставляем приведенные выше основные параметры.

Получим **давление грунта на лобовой поверхности ножа**

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{c(1+\omega_0)\text{tg}\delta \cdot 2,7}{a(1-\text{tg}\mu\text{tg}\delta) \left(2,12\cos\gamma - \frac{\text{tg}\Theta}{\text{tg}\delta + \text{tg}\mu}\right)}} + \frac{\text{tg}\delta \text{tg}\Theta(1+\omega_0)}{(1-\text{tg}\mu\text{tg}\delta)} + \frac{1,2c}{\text{tg}\delta + \text{tg}\mu} + \frac{0,66 \left(2,12\cos\gamma - \frac{\text{tg}\Theta}{\text{tg}\delta + \text{tg}\mu}\right)}{0,66 \left(2,12\cos\gamma - \frac{\text{tg}\Theta}{\text{tg}\delta + \text{tg}\mu}\right)}. \quad (49)$$

Анализируем далее.

Как и в модели [3] (при отсутствии пластических деформаций и ядра уплотнения) с увеличением угла резания δ давление на ноже σ_B в диапазоне углов $\delta < \delta_1$ возрастает. Если угол резания находится в диапазоне $\delta > \delta_1$, то давление σ_B сначала падает, а затем снова растет.

Убывание σ_B в начальный период объясняется следующим образом. При этом напомним, что $\varepsilon = \frac{\sigma_1}{\sigma_B}$ – отношение давлений у передней σ_1 и верхней σ_B кромок ножа [1, (33)], находится в пределах $0 < \varepsilon < 1$, и в отличие от работ [2, 3] не равно нулю.

Возьмем производную в формуле $(1-\varepsilon^2)(\delta'+\mu') = \frac{g}{\gamma'}$ из [1, (38)] по t (при $\varepsilon = 0$, что соответствует минимальному углу резания с выпором грунта перед ножом $\delta = \delta_1$):

$$\begin{aligned} & -2 \frac{d\varepsilon}{dt} \varepsilon(\delta'+\mu') \Big|_{\varepsilon=0} + (1-\varepsilon^2) \Big|_{\varepsilon=0} \frac{d\delta'}{dt} = \\ & = \frac{1}{\gamma'} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\gamma'} \left(-\frac{m}{t^2} \right), \end{aligned}$$

то есть $\frac{d\delta'}{dt} = -\frac{m}{\gamma' t^2} < 0$ (убывающая функция).

Рост t (а вместе с ним и σ_B) в последующем следует из равенства $u(1+\varepsilon) = \delta'g$ [1, (37)]. Но убывание σ_B при переходе через граничное значение δ_1 бывает не всегда, так как в более точной записи

$g(t) = \frac{m}{t} + n\left(1 + \frac{t}{6}\right)$ есть и возрастающая составляющая $\frac{nt}{6}$ (это условие опустим).

Для определения сил резания нужно знать величину σ_{cp} .

Из формул

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_B + \sigma_1}{2} = \frac{\sigma_B}{2}(1 + \varepsilon)$$

и $u(1 + \varepsilon) = \delta''g$ работы [1], с учетом того, что $\sigma_B = \frac{1 + \omega_0}{a}t$, среднее давление грунта на ноже будет

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_B}{2} \frac{\delta''g}{u} = \frac{1 + \omega_0}{2a} t \frac{\delta'(m + nt) \frac{1}{t}}{(1 - \delta'\mu')\gamma' t \left(1 + \frac{5}{6}t\right)}$$

То есть

$$\sigma_{cp} = \frac{1 + \omega_0}{a} \frac{\delta'}{1 - \delta'\mu'} \frac{(m + nt)}{\gamma' t \left(1 + \frac{5}{6}t\right)}, \quad (50)$$

где $\sigma_B = \frac{1 + \omega_0}{a}t$; $m = \frac{2ac}{1 + \omega_0}$; $u = \text{tg}\Theta$;

$\delta' = \text{tg}\delta$; $\mu' = \text{tg}\mu$; $\gamma' = \cos\gamma$; а значение t определяется по формулам (47) или (48).

Теперь можно найти **размеры зоны пластического разрушения** грунта перед ножом (рис. 3).

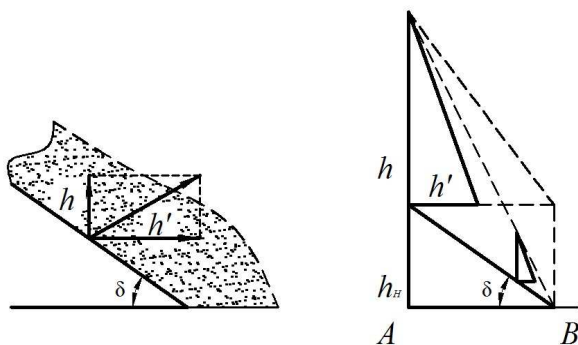


Рис. 3. Соотношение зон пластического разрушения грунта перед лобовой гранью ножа

Высота зоны пластической деформации грунта (из [2, (6)])

$$h = h_H \frac{2}{t \left(1 + \frac{5}{6}t\right)}. \quad (51)$$

где h_H – высота ножа.

Длина зоны выпора вперед перед лобовой гранью ножа, с учетом соотношения [2, (14)] и высоты h ,

$$h' = \frac{2(\delta' + \mu')h_H}{(1 - \delta'\mu')t \left(1 + \frac{5}{6}t\right)}. \quad (52)$$

Выводы

1. Рассмотрен вариант щелевого резания суглинка широким плоским ножом в условиях образования зоны пластической деформации перед лобовой поверхностью ножа.

2. Получены условия возникновения выпора грунта перед ножом и определены основные их параметры в процессе резания.

3. Установлен максимальный угол резания, при котором начинает расти ядро уплотнения на ноже, формирующееся из уплотняющейся массы грунта перед его лобовой поверхностью.

4. Определены значения давлений на лобовой поверхности ножа и размер зоны разрушенного грунта.

Литература

1. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Новиков Р.Ю. Модель пластической деформации грунта при щелевом резании // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини.– К.: КНУБА, 2011.– Вип. 77.– С.3-10.
2. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Пузаков Д.В. Характеристики процесса резания грунта в замкнутом пространстве // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини.– К.: КНУБА, 2006.– Вип. 67.– С.8-11.
3. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Литвиненко И.Н. Модель косоугольного щелевого резания грунта широким острым ножом // Техніка будівництва.– К.: КНУБА, 2006.– Вип. 18.– С.4-11.

Рецензент: С.В. Кравець, д.т.н., проф. (НУВГП)

Отримано: 18.12.2011 р.